مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy

مقاله پژوهشی

مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال سی و دوم، شمارهٔ چهارم، زمستان ۱۴۰۳، از صفحهٔ ۶۱۷ تا ۶۲۸

کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و بررسی سیال‌های درگیر مربوط به سامانه کانه‌زایی مس رگه‌ای در منطقه سماخون، شمال‌غرب تربت جام

بهاره بروزی نیت[۱]، آزاده ملکزاده شفارودی*[۲]، حسین عزیزی[۳]، محمد حسن کریم‌پور[۲]، بهنام رحیمی[۲]

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- گروه معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۲/۱)

چکیده: منطقه اکتشافی سماخون در استان خراسان رضوی و در شمال غربی تربت جام قرار دارد. واحدهای سنگی منطقه شامل سنگ‌های آتشفشانی، رسوبی و گرانیتوئیدهای نیمه عمیق هستند. یک نوع از کانه‌زایی‌های موجود در منطقه، کانی‌سازی رگه-رگچه‌ای است که در واحد توف آندزیتی تا بازالتی و مرز آن با آهک رخنمون دارد. کانی‌های اولیه کالکوپیریت، پیریت و بورنیت هستند و کانی-سازی ثانویه شامل مالاکیت، کالکوسیت، کوولیت، هماتیت، گوتیت و آزوریت است. مهمترین کانی باطله همراه با کانی‌سازی، کانی کوارتز است که به صورت پرکننده فضاهای خالی و رگچه‌ای دیده می‌شود. کانی‌سازی دارای بی‌هنجاری مس با مقدار ۴/۵ درصد است و سایر عناصر ارزش اقتصادی ندارند. پایه بررسی سیال های درگیر در کانی کوارتز، دمای تشکیل کانی‌سازی ۱۷۸ تا ۳۴۵ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱۳/۷ تا ۲۰/۶ درصد است. براساس شواهد زمین‌شناسی و کانه‌زایی، تشکیل یکی از کانی‌سازی‌های منطقه سماخون نشانگر کانسارهای مس رگه‌ای گرمابی است.

واژه‌های کلیدی: *کانی‌سازی رگه‌ای؛ سیال درگیر؛ زمین‌شیمی؛ سماخون؛ تربت جام.*

مقدمه

کانه‌زایی رگه‌ای از مهمترین ذخایر معدنی محسوب می‌شود. چنین ذخایر رگه‌ای بدیهی است که خاستگاه گرمابی دارند، اگرچه منبع سیال های کانه‌ساز ممکن است ماگمایی یا غیر ماگمایی باشد [۱]. در بسیاری از موارد، هم خاستگاه سیال و هم فرآیندهای ته‌نشست فلزها از محلول‌های گرمابی هنوز به شدت مورد بحث است [۲].

منطقه اکتشافی سماخون در فاصله ۶۷ کیلومتری شمال غربی تربت جام و ۱۴۵ کیلومتری جنوب شرق مشهد در استان خراسان رضوی قرار دارد. این منطقه در گستره عرض‌های جغرافیایی ″۹/۴۲ ′۳۸ °۳۵ تا ″۲۱/۵۴ ′۳۶ °۳۵ و طول‌های جغرافیایی ″۵۶/۵۲ ′۲۵ °۶۰ تا ″۵۸/۶۶ ′۲۳ °۶۰ واقع است. از نظر جایگاه زمین‌شناسی و تقسیم‌های ساختاری، منطقه اکتشافی سماخون در شمال شرق زون خردقاره ایران مرکزی و جنوب زون کپه داغ قرار دارد (شکل ۱).

شرایط زمین‌شناسی و جایگاه زمین‌ساختی، فعالیت‌های ماگمایی، وجود گسل‌ها و درز و شکاف‌های فراوان که بهترین مسیرها برای راه‌یابی و ته‌نشینی مواد معدنی به شمار می‌روند،

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۱۱۹۲۱۳۲، پست الکترونیکی: shafaroudi@um.ac.ir

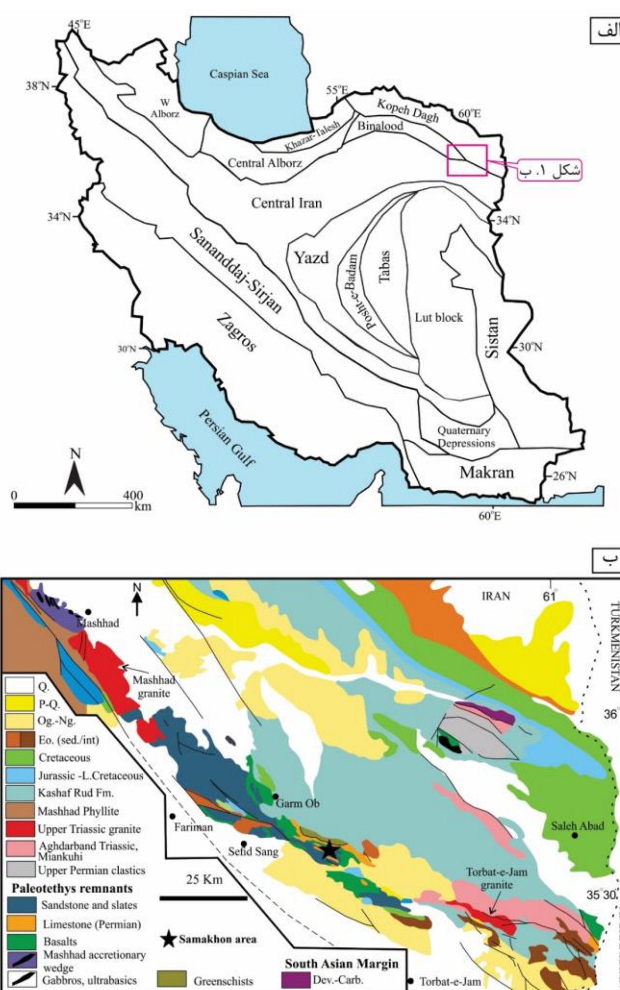
[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.617]

در مجموع شرایط بسیار آرمانی از نظر تمرکز غیر عادی عناصر و کانی‌سازی‌های با ارزش در بخش‌هایی از این ناحیه را فراهم نموده‌اند. از جمله کانی‌سازی‌های گزارش شده در این منطقه می‌توان به سامانه رگه‌ای سرب و روی ± مس و آنتیموان در شمال تربت جام [۳]، کانسار رگه‌ای آنتیموان سیرزار در شمال غرب تربت جام [۴، ۵]، ذخیره طلا- تنگستن تاریک دره در شمال تربت جام [۶]، کانسار مس رگه‌ای منطقه المجوق در شمال شرقی تربت جام [۷] و کانسار مس و طلا فیروزکوه در شمال شرقی تربت جام [۸] اشاره نمود.

در این پژوهش، داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌سازی، زمین- شیمی و سیال‌های درگیر مربوط به کانی‌سازی نوع رگه‌ای در منطقه اکتشافی سماخون بررسی شده است.

روش بررسی

به منظور بررسی کانی‌سازی و واحدهای سنگی در منطقه سماخون، پیمایش صحرایی و نمونه‌برداری صورت گرفت. برای بررسی سنگ‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و روابط همبرزایی ۵۰ مقطع نازک، ۱۰۰ مقطع نازک صیقلی و ۲۰ قطعه صیقلی تهیه گردید. سپس نقشه زمین‌شناسی- کانی‌سازی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ در نرم‌افزار Arc GIS تهیه شد. برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی، تعداد ۴ نمونه خرده سنگی سطحی از محل رگه‌های کانی‌سازی و ترانشه‌ها برداشت شد و پس از خردایش و نرمایش، به روش طیف‌سنجی نشر اتمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) با آماده‌سازی به روش تیزاب سلطانی برای ۲۶ عنصر و روش عیارسنجی گرمایی برای طلا در آزمایشگاه زرآزما تجزیه شدند.



شکل ۱ الف) نقشه زمینه شناسی- ساختاری ایران [۹، ۱۰]. ب) نقشه زمین‌شناسی بخشی از پهنه‌های کپه داغ، بینالود و شمال شرق خرد قاره ایران مرکزی [۱۱] و موقعیت منطقه اکتشافی سماخون.

پنج مقطع دوبرصیقل کانی کوارتز (مهترین کانی باطله همراه با کانه‌ها) برای دماسنجی، تعیین نوع نمک‌ها و مقدار شوری بررسی شدند. آزمایش‌های دماسنجی سیال‌های درگیر با یک دستگاه سردکننده و گرم‌کننده ساخت شرکت لینکام مدل THM 600 در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. دقت کار دستگاه در مرحله‌های سرد و گرم کردن $\pm1^{\circ}C$ و گستره دمایی دستگاه از ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد بود. مقدار شوری و چگالی در سامانه H_2O-NaCl با نرم افزار موجود در اکسل HOKIEFLINCS-H_2O -NaCl [۱۲، ۱۳] محاسبه شد. سرانجام نمودار ستونی‌های مناسب در نرم افزار SPSS رسم شده و همراه با نمودارهای سیال‌های درگیر تفسیر شدند.

زمین‌شناسی

منطقه اکتشافی سماخون در بخش جنوب شرقی نقشه زمین-شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سفید سنگ قرار دارد [۱۴]. با توجه به بازدیدهای صحرایی و بررسی‌های انجام شده، واحدهای سنگی منطقه شامل سه دسته سنگ‌های آذرین نیمه عمیق، آتشفشانی و رسوبی هستند (شکل ۲). سنگ‌های آتشفشانی در این منطقه توف‌های بازالتی تا آندزیتی، بازالت و الیوین بازالت هستند. این سنگ‌ها به رنگ سیاه تا سبز در صحرا دیده می-شوند (شکل‌های ۳ الف و ب). توف بازالتی تا آندزیتی بیشترین رخنمون را در منطقه مورد بررسی دارد. بافت غالب این واحد آذرآواری و بافت‌های فرعی آن بادامکی (حفره‌ای) است. واحدهای بازالت و الیوین بازالت دارای بافت غالب پورفیری هستند و در برخی بخش‌ها، بافت‌های بادامکی و تراکیتی در آن‌ها دیده می‌گردد. درشت بلورها شامل کانی‌های پلاژیوکلاز، پیروکسن و الیوین هستند که در زمینه‌ای دانه‌ریز از جنس پلاژیوکلاز و کانی ثانویه کلریت قرار دارند. حفره‌های سنگ با کانی‌های ثانویه از جمله اپیدوت، کلریت، کربنات و سیلیس پر شده‌اند که نشانگر پهنه دگرسانی پروپلیتیک هستند. رنگ سبز این واحد نیز ناشی از حضور کانی‌های اپیدوت و کلریت است.

سنگ‌های رسوبی منطقه مورد بررسی آهک، ماسه سنگ، شیل و میکروکنگلومرا هستند. آهک‌ها با برخوردگاه گسل روراندگی روی واحد توف آندزیتی تا بازالتی رخنمون دارند (شکل ۳ پ). واحد آهکی کرم تا خاکستری رنگ دارای گل کربناتی میکریتی است و در برخی بخش‌ها، بلورهای کلسیت در آن دیده می‌شوند. این واحد سنگی بدون سنگواره، دگرشیمی یا خرده‌های فسیلی است و رگچه‌های کلسیت اسپارایتی و استیلولیت‌هایی از جنس اکسید آهن در آن دیده می‌گردد. وجود گل کربناتی بدون دانه بیانگر از رسوبگذاری کربنات در محیط آرام است. ماسه‌سنگ‌ها دارای لایه‌بندی افقی هستند و به رنگ کرم تا خاکستری دیده می‌شوند (شکل ۳ ت). کانی‌های دیده شده در این واحد شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپات قلیایی، بیوتیت و خرده سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی هستند. کانی‌های نام برده در سیمانی از جنس کربنات و سیلیس قرار دارند. از نظر بافتی، کانی‌ها دارای جورشدگی بد و گردشدگی ضعیفی هستند و بر پایه تقسیم‌بندی بافتی در رده نیمه بالغ قرار می‌گیرند. این ماسه سنگ شبه آرکوز نامیده می‌گردد. شیل‌های منطقه مورد بررسی دارای رخنمون قرمز تا خاکستری رنگ هستند و دستخوش فرسایش شدید شده‌اند. واحد کنگلومرا از کانی‌ها و سنگ‌های مختلف تشکیل شده است و با رنگ کرم در صحرا رخنمون دارد. کانی‌های دیده شده در این واحد شامل کوارتز، فلدسپات قلیایی، پلاژیوکلاز و بیوتیت هستند. اسلیت، میکاشیست، چرت و آندزیت از جمله قطعه‌های سنگی موجود در کنگلومرا هستند. این سنگ در معرض فشارهای زمین‌ساختی قرار گرفته و در بیوتیت‌ها دگرشکلی رخ داده است.

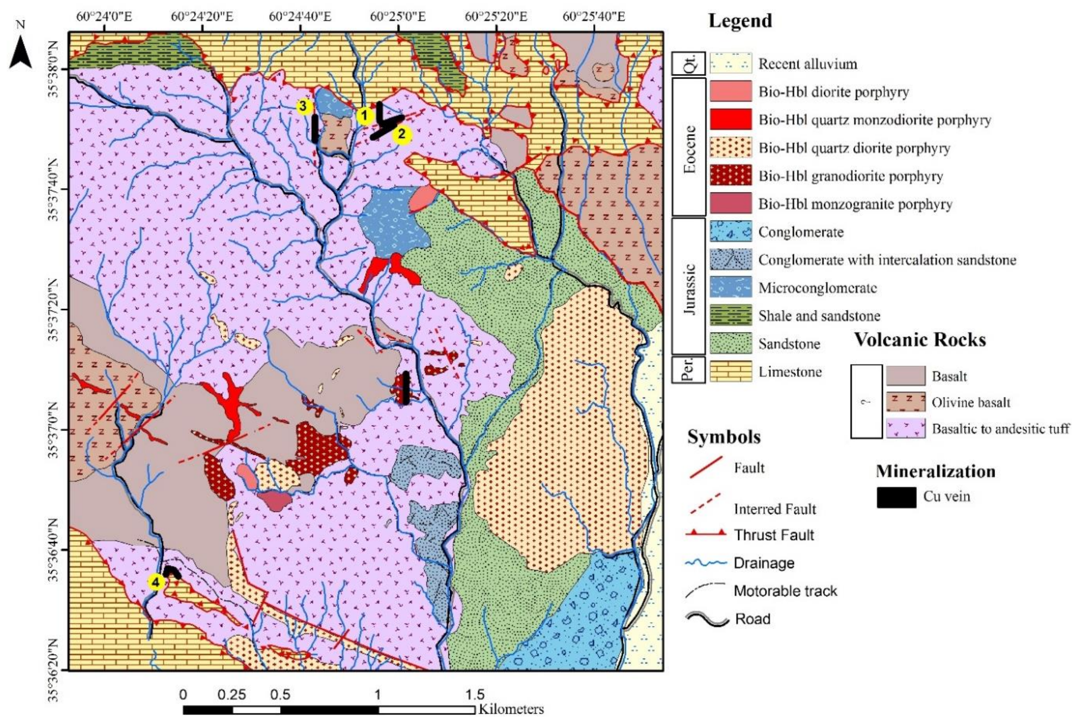
سنگ‌های آذرین نیمه عمیق (گرانیتوئیدها) در منطقه سماخون، در بخش مرکزی و شرقی منطقه رخنمون دارند. گرانیتوئیدها در این محدوده به صورت استوک و دایک درون واحدهای آتشفشانی نفوذ کرده‌اند و شامل مونزوگرانیت، گرانودیوریت، کوارتز دیوریت، کوارتز مونزودیوریت، و دیوریت هستند. این سنگ‌ها دارای بافت پورفیری بوده و کانی‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها شامل بلورهای پلاژیوکلاز، ارتوکلاز، هورنبلند، بیوتیت و به مقدار کم کوارتز هستند. دایک‌های گرانیتوئیدی بیشتر دگرسانی آرژیلیکی دارند و با گسل‌های راستالغز جابجا شده‌اند.

کانی‌سازی و دگرسانی

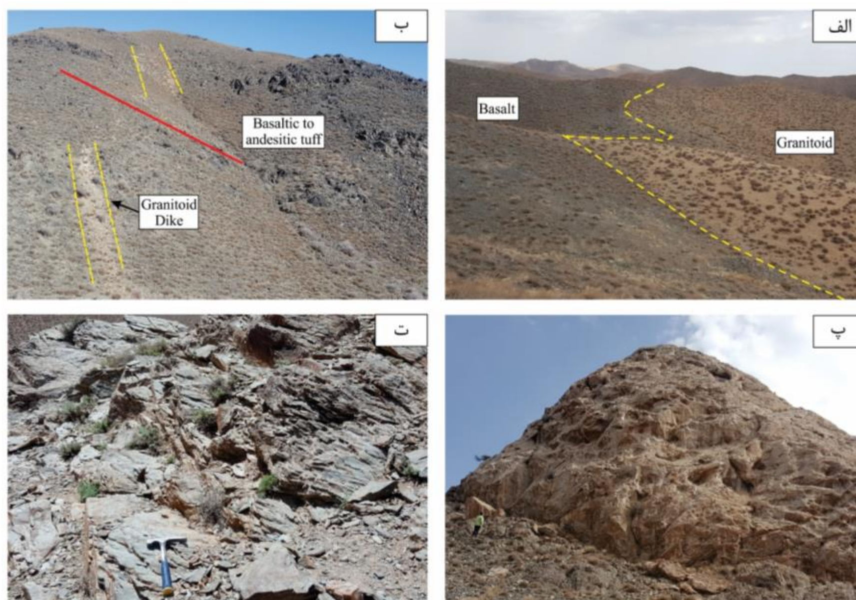
از جمله کانه‌زایی‌های شناسایی شده در سماخون می‌توان به کانی‌سازی رگه-رگچه‌ای مربوط به پهنه‌های گسلی در شمال و جنوب غربی منطقه اشاره نمود (شکل‌های ۴ الف و ب). در بخش شمالی منطقه، رگه‌های کانه‌زایی شماره ۱ تا ۳ در واحد توف بازالتی تا آندزیتی با راستای شمالی- جنوبی تا شمال شرقی- جنوب غربی تشکیل شده‌اند و در بخش جنوب غربی منطقه، رگه کانی‌سازی شماره ۴ در مرز بین واحد آهکی با توف بازالتی تا آندزیتی با راستای شمال غربی- جنوب شرقی رخنمون دارد (شکل ۲). شیب رگه‌های کانی‌سازی حدود ۹۰ درجه است. طول رگه‌های کانی‌سازی از ۵ تا ۳۰ متر و عرض آن‌ها از ۰/۵ تا ۳ متر متغیر است. با توجه به ترانشه‌های

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.617]

اکتشافی احداث شده و بررسی‌های میکروسکوپی، کانی‌سازی در همه رگه‌ها یکسان و شبیه هم بوده و کانه‌زایی اولیه شامل کانه‌های پیریت، بورنیت و کالکوپیریت است. کانی‌سازی ثانویه نیز شامل از کانه‌های مالاکیت، کالکوسیت، کوولیت، هماتیت، گوتیت و به مقدار جزئی آزوریت است. مهمترین کانی باطله همراه با کانی‌سازی، کانی کوارتز است که به صورت پرکننده فضاهای خالی سنگ میزبان و رگچه‌ای دیده می‌شود. کانی کلسیت نیز با فراوانی کمتری نسبت به کوارتز در پهنه‌های کانه‌زایی، به صورت رگچه‌ای دیده شده است.

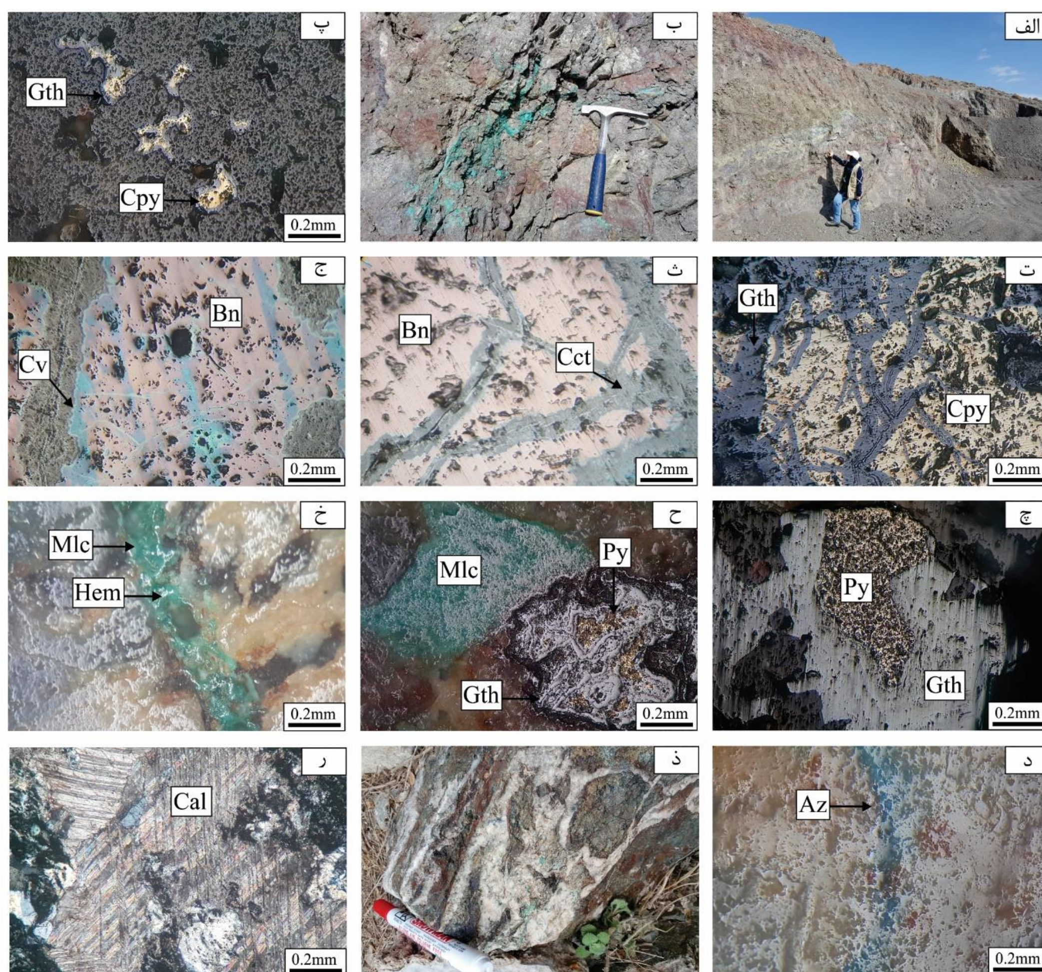


شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه سماخون.



شکل ۳ رخنمون واحدهای سنگی منطقه سماخون؛ الف) نمایی از مرز بازالت با گرانیتوئیدها (دید به سمت جنوب شرق)، ب) رخنمون دایک گرانیتوئیدی درون توف بازالتی تا آندزیتی، پ) آهک (دید به سمت جنوب) و ت) ماسه سنگ.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.617]



شکل ۴ کانی‌سازی منطقه اکتشافی سماخون: الف) رخنمون ترانشه‌های اکتشافی مربوط به رگه‌های کانی‌سازی، ب) نمایی از رگچه مالاکیتی در دیواره ترانشه، پ) کالکوپیریت با بافت پراکنده در حال تبدیل به گوتیت، ت) کانی کالکوپیریت و تبدیل آن به کانی گوتیت در ساختار رگچه، ث) کانی بورنیت و تبدیل آن به کانی کالکوزیت در ساختار رگچه، ج) نمایی از کانه بورنیت در حال تبدیل به کوولیت، چ) کانی پیریت در حال تجزیه به گوتیت، ح) مالاکیت پراکنده در متن سنگ و کانی گوتیت با بافت گل کلمی ناشی از تبدیل پیریت، خ) رگچه مالاکیت و هماتیت، د) رگچه آزوریت، ذ) رخنمون صحرایی رگچه‌های کوارتز همراه با کانی‌سازی، ر) کانی کلسیت در ساختار رگچه (کالکوپیریت = Cpy، مالاکیت = Mlc، کالکوزیت = Cct، بورنیت = Bn، کوولیت = Cv، پیریت = Py، آزوریت = Az، هماتیت = Hem، گوتیت = Gth و کلسیت = Cal [۱۵]).

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.617]

بافت و ساخت ماده معدنی

بافت پراکنده: پهنه کانی‌سازی و دیواره ترانشه‌ها در سنگ میزبان وجود دارد. فضاهای خالی موجود در واحد توف بازالتی تا آندزیتی نیز با کانه‌ها و کوارتز پر شده‌اند. پیریت، کالکوپیریت، بورنیت و کانی‌های ثانویه ناشی از تبدیل آن‌ها در بیشتر این بافت دیده می‌شوند (شکل ۴ پ). این کانی‌ها به شکل پراکنده حدود ۵ تا ۱۰ درصد از حجم سنگ میزبان را تشکیل می‌دهد. این بافت در رگه‌های شماره ۴ و ۲ بیشتر دیده می‌شود.

بافت رگچه‌ای مهمترین بافت کانه‌زایی در منطقه سماخون است که با فراوانی چشمگیری در هر ۴ رگه کانی‌سازی مورد بررسی دیده می‌شود (شکل‌های ۴ ت، ث، خ، د و ر). رگچه‌ها متنوع هستند و سنگ میزبان را قطع کرده‌اند. ضخامت رگچه‌ها از ۰/۱ میلی‌متر تا ۵ سانتی‌متر متغیر است. براساس ترکیب کانی‌شناسی اولیه، ۴ رگچه کالکوپیریت ± بورنیت ± کوارتز، بورنیت ± کوارتز، کالکوپیریت ± کوارتز و کلسیت را می‌توان در پهنه‌های کانی‌سازی تفکیک نمود

بافت جانشینی ثانویه در اثر تبدیل کانی‌های اولیه به کانی‌های ثانویه به وجود آمده است و در همه رگه‌های کانی‌سازی دیده می‌شود (شکل‌های ۴ پ تا ح). کانی‌های مالاکیت، آزوریت، کالکوزیت و گوتیت از جانشینی کالکوپیریت و کانی‌های کوولیت و کالکوزیت از جانشینی بورنیت تشکیل شده‌اند.

آثار کانی‌های کالکوپیریت و بورنیت بر کانی‌های ثانویه به جا مانده است. مقدار تبدیل کالکوپیریت‌ها از ۵ تا ۱۰۰ در صد متغیر است. کانه پیریت نیز به کانی‌های هماتیت و گوتیت تبدیل شده که مقدار تبدیل آن‌ها به ترتیب ۶۰ تا ۱۰۰ و ۴۰ تا ۱۰۰ درصد است.

بافت گل کلمی یا کلوییدی تنها در برخی از گوتیت‌ها دیده می‌گردد و فراوانی قابل توجهی ندارد (شکل ۴ ح). این بافت در رگه شماره ۱ به فراوانی دیده می‌شود.

کانی‌شناسی

کالکوپیریت: کالکوپیریت از مهمترین کانی‌های سولفیدی مس‌دار اولیه در منطقه سماخون است که با بافت پراکنده و رگچه‌ای دیده می‌شود (شکل‌های ۴ پ و ت). اندازه کالکوپیریت‌های پراکنده بین ۰/۲ تا ۲ میلی‌متر است. کالکوپیریت‌ها بیشتر بی‌شکل هستند و حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد از حجم کانی‌سازی را تشکیل می‌دهند. بیشترین فراوانی کالکوپیریت‌ها مربوط به رگه شماره ۲ و کمترین فراوانی آن مربوط به رگه شماره ۳ است. این کانی از لبه به کانی‌های ثانویه کالکوزیت، مالاکیت، آزوریت و گوتیت تبدیل شده است. میزان تبدیل کالکوپیریت به کالکوزیت بین ۵ تا ۴۰ درصد، به کوولیت بین ۴۰ تا ۱۰۰ درصد، به مالاکیت و آزوریت بین ۷۰ تا ۱۰۰ درصد و به گوتیت ۱۰ تا ۹۰ درصد است. آثار و بقایای کانی کالکوپیریت بر کانی‌های ثانویه قابل مشاهده است. ضخامت رگچه‌های کالکوپیریت ± کوارتز از ۰/۱ تا ۴ میلی‌متر و رگچه‌های کالکوپیریت ± بورنیت ± کوارتز از ۰/۲ تا ۳ میلی‌متر متغیر است.

بورنیت: بورنیت‌ها نیز از دیگر کانی‌های سولفیدی مس‌دار اولیه در منطقه سماخون هستند. بورنیت‌ها نیز مانند کالکوپیریت‌ها به دو صورت پراکنده و رگچه‌ای دیده شدند (شکل‌های ۴ ث و ج). میزان فراوانی آن‌ها ۱۵ تا ۲۰ درصد است. بورنیت‌ها از لبه به کانی‌های ثانویه کالکوزیت و کوولیت تبدیل شده‌اند. مقدار تبدیل این کانی ۱۵ تا ۸۰ درصد است. ضخامت رگچه‌های بورنیت ± کوارتز از ۰/۱ میلی‌متر تا ۳ سانتی‌متر متغیر است. فراوانی کانه بورنیت به ترتیب در رگه‌های ۲، ۴، ۱ و ۳ کاهش می‌یابد به طوری که در رگه شماره ۳ فراوانی آن به ۱ تا ۳ درصد از حجم سنگ می‌رسد.

پیریت: بلورهای پیریت به صورت پراکنده در سنگ میزبان دیده می‌شوند (شکل‌های ۴ چ و ح). پیریت‌ها بیشتر بی‌شکل هستند و اندازه آن‌ها از ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر متغیر است. فراوانی این کانی ۲ تا ۳ درصد از حجم کانی‌سازی است. پیریت‌ها به کانی‌های ثانویه گوتیت و هماتیت تبدیل شده‌اند. مقدار تبدیل پیریت به هماتیت ۶۰ تا ۱۰۰ و به گوتیت ۴۰ تا ۱۰۰ درصد است. این کانی در رگه شماره ۴ کمترین و در رگه‌های شماره ۲ و ۱ بیشترین فراوانی را دارد.

کالکوزیت: کالکوزیت با بافت جانشینی ثانویه به صورت پراکنده و رگچه‌ای در پهنه کانی‌سازی وجود دارد. این کانی از تبدیل کانی‌های بورنیت و کالکوپیریت تشکیل شده است. آثار کالکوپیریت و بورنیت‌ها بر کالکوزیت‌ها قابل دیده است (شکل ۴ ث). فراوانی کالکوزیت‌ها در رگه‌های شماره ۲ و ۴، ۱۰ تا ۱۵ درصد و در رگه‌های شماره ۳ و ۱، ۲ تا ۵ درصد از حجم کانی‌سازی است.

کوولیت: این کانی مانند کالکوزیت‌ها با بافت جانشینی ثانویه به دو صورت پراکنده و در قالب رگچه دیده گردید. کوولیت‌ها فراوانی ۵ تا ۱۰ درصد از حجم کانی‌سازی را دارند و ناشی از تبدیل کانه بورنیت هستند (شکل ۴ ج). این کانی در رگه‌های ۲ و ۴ بیشترین فراوانی را دارد.

مالاکیت و آزوریت: مالاکیت فراوان‌ترین کانی ثانویه مس در منطقه سماخون بوده و به صورت پراکنده و رگچه‌ای در سنگ میزبان تشکیل شده است (شکل‌های ۴ ح و خ). فراوانی مالاکیت بین ۱۵ تا ۶۰ درصد متغیر است. در رگه‌های شماره ۱ و ۳ بیشترین مقدار مالاکیت و در رگه شماره ۲ کمترین مقدار این کانی رخنمون دارد. آزوریت با فراوانی کمتری نسبت به مالاکیت دیده گردید. فراوانی این کانی ۳ تا ۵ درصد است و به صورت پراکنده و رگچه‌ای دیده می‌شود (شکل ۴ د). بیشترین مقدار این کانی در رگه شماره ۴ وجود دارد. این دو کانی در اثر تبدیل کانه کالکوپیریت به وجود آمده‌اند.

هیدروکسید و اکسیدهای آهن و واد: هیدروکسید و اکسیدهای آهن ثانویه شامل گوتیت و هماتیت برآمده از تبدیل کانی سولفیدی پیریت در منطقه هستند. هماتیت و گوتیت به صورت پراکنده و رگچه‌ای دیده می‌شوند. هماتیت‌ها در نتیجه تبدیل پیریت و گوتیت‌ها در اثر تبدیل کالکوپیریت و پیریت تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۴ چ تا خ). فراوانی گوتیت حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد و هماتیت ۳ تا ۵ درصد است. بیشترین مقدار گوتیت و هماتیت در رگه شماره ۲ رخنمون دارد. بافت کلوییدی یا گل کلمی در برخی از گوتیت‌ها آشکارا دیده می‌شود. هیدروکسید

منگنز (واد) با بافت دارینه‌ای ترانشه‌های اکتشافی دیده می‌شود.

کوارتز: مهمترین و فراوان‌ترین کانی باطله همراه با کانه‌زایی در منطقه مورد بررسی، کانی کوارتز است که به صورت پرکننده فضای خالی و رگچه‌های مختلف دیده می‌شود (شکل ۴ ذ). رگچه‌های کوارتز همراه با کانی‌سازی اولیه رگچه کوارتز ± کالکوپیریت به ضخامت ۰/۱ تا ۴ میلی‌متر و رگچه بورنیت ± کوارتز به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر تا ۳ سانتی‌متر هستند.

کلسیت: کلسیت به صورت رگچه‌ای در پهنه‌های کانه‌زایی دیده می‌گردد، اما فراوانی آن از کانی کوارتز بسیار کمتر (۵ تا ۱۰ درصد) است. رگچه‌های کلسیتی، رگچه‌های کوارتز و کانی‌سازی همراه با آن را قطع کرده‌اند. ضخامت رگچه‌های کلسیتی از ۰/۱۵ تا ۱/۵ میلی‌متر متغیر است (شکل ۴ ر). فراوانی رگچه‌های کلسیتی در پهنه‌های کانی‌سازی مربوط به رگه‌های ۱ و ۴ بیشتر است.

توالی همبرزایی

توالی همبرزایی رگه‌های کانی‌سازی در منطقه اکتشافی سماخون به دو مرحله پهنه درونزاد و پهنه اکسیدی تقسیم می‌شود (شکل ۵). در مرحله درونزاد، محلول کانه‌دار شامل مس، آهن و سیلیس از راه گسل‌ها و شکستگی‌ها به واحد توف بازلتی تا آندزیتی نفوذ کرده و در فضاهای خالی سنگ و درون درز و شکاف‌ها باعث تشکیل پیریت، بورنیت و کالکوپیریت همراه با کوارتز و مقداری کلسیت شده است. در مرحله اکسایشی، کانی‌سازی در معرض فرایندهای اکسایش و هوازدگی سطحی قرار گرفته است. این فرایند موجب تغییر و تبدیل کانی‌های اولیه به کانه‌های ثانویه سولفیدی مس چون کالکوزیت، کوولیت و همچنین کانه‌های کربناتی مانند مالاکیت، آزوریت و کانه‌های اکسیدی و هیدروکسیدی چون هماتیت و گوتیت شده است.

زمین‌شیمی

با توجه به سامانه رگه-رگچه‌ای کانی‌سازی در منطقه اکتشافی سماخون، نمونه‌های سطحی به روش خرده سنگی و عمود بر راستای رگه‌های کانی‌سازی جمع آوری شدند. براساس نتایج به دست آمده از تجزیه ICP-OES، گستره تغییرات عنصر مس از ۲/۲ تا ۴/۵ درصد است و با حضور کانی‌های مس از جمله مالاکیت، کوولیت، بورنیت، کالکوزیت و کالکوپیریت ارتباط دارد. بیشترین مقدار عنصر مس (۴/۵ درصد) مربوط به رگه شماره ۲ و کمترین مقدار آن مربوط به رگه شماره ۱ در شمال منطقه است. با افزایش حجم کانی‌های نام برده در ترانشه‌های کانی‌سازی، مقدار عنصر مس نیز افزایش می‌یابد. مقدار عنصر نقره در نمونه‌های تجزیه شده بسیار کم بوده و گستره تغییرات آن از ۲۴/۶ تا کمتر از ۰/۵ گرم در تن است. عناصر سرب و روی نیز از نظر اقتصادی قابل توجه نیستند و مقدار آن‌ها به ترتیب ۴ تا ۷ و ۱۱۱ تا ۱۲۸ گرم در تن است. مقدار عناصر آرسنیک و آنتیموان به ترتیب از ۱/۸ تا ۴۸۹ و ۰/۷ تا ۲۳ گرم در تن متغیر است. مقدار بالای آرسنیک مربوط به رگه شماره ۴ در بخش جنوب غربی منطقه است، اما طی بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی، کانی‌های دارای آرسنیک چون آرسنوپیریت دیده نشدند. مقدار عنصر منگنز از ۷۴۰ تا ۱۰۳۶ گرم در تن متغیر بوده و مربوط به حضور کانی واد در ترانشه‌های اکتشافی است. گستره تغییرات عنصر آهن از ۲/۵ تا ۵/۷ درصد متغیر بوده که مربوط به پهنه گوسان است. براساس عیارسنجی گرمایی، عنصر طلا ناچیز بوده (کمتر از ۱۳ میلی گرم در تن) و بدون ارزش اقتصادی است (جدول ۱).

Minerals	Hypogene	Oxidized zone
Pyrite		
Chalcopyrite		
Bornite		
Quartz		
Calcite		
Chalcocite		
Covellite		
Malachite		
Azurite		
Goethite		
Hematite		
Wad		

شکل ۵ توالی همبرزایی کانی‌سازی رگه‌ای در منطقه اکتشافی سماخون.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.617]

جدول ۱ نتایج تجزیه نمونه‌های زمین‌شیمیایی خرده‌سنگی منطقه اکتشافی سماخون (طلا به روش عیارسنجی گرمایی و سایر عناصر به روش ICP-OES)

نمونه	X	Y	Cu	Ag	Pb	Zn	As	Sb	Mn	Fe	Au
			ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb
SaCh-16	۲۶۵۹۸۷٫۹۷	۳۹۴۶۱۹۸٫۲۵	۲۲۰۴۹	<۰٫۵	۶	۱۱۵	۲٫۳	۰٫۸۹	۱۰۳۶	۵۱۴۷۵	۶
SaCh-17	۲۶۶۰۲۸٫۶۲	۳۹۴۶۱۰۳٫۴۸	۴۵۵۴۴	۳٫۹	۷	۱۲۸	۲	۰٫۸۵	۷۷۳	۵۳۲۶۶	۵
SaCh-19	۲۶۵۶۶۳٫۹۲	۳۹۴۶۱۱۱٫۵۲	۳۲۹۷۲	۱٫۱	۷	۱۱۱	۱٫۸	۰٫۷۳	۸۹۲	۵۷۸۱۵	۱۳
SaCh-87	۲۶۴۹۳۰٫۴	۳۹۴۳۸۴۲٫۷	۲۶۷۸۰	۲۴٫۶	۴	۱۲۱	۴۸۹	۲۳	۷۴۰	۲۵۰۹۵	۹

بررسی سیال‌های درگیر

سیال‌های درگیر بخش غیر قابل تفکیک از هر سنگ یا کانی هستند و بررسی آن‌ها به عنوان روشی مستقیم، برای تعیین وضعیت سیال‌های کانه‌ساز و فرآیندهای مؤثر در تشکیل ذخایر اهمیت بسیاری دارد و اطلاعات مهمی در ارتباط با خاستگاه سیال‌ها و فلزها و اهمیت نسبی آب‌های ماگمایی، جوی و سازندی ارائه می‌کند [۱۶].

در منطقه سماخون، کوارتز مهمترین کانی باطله همراه با کانه‌زایی در رگچه‌ها و فضاهای خالی سنگ میزبان است. پس از بررسی‌های و بررسی‌های سنگ‌نگاری، دماسنجی سیال‌های درگیر برای ۵ مقطع دوبرصیقل از کوارتزهای مربوط با ۴ رگه کانی‌سازی در منطقه انجام شد. در مجموع، برای ۷۷ سیال درگیر به منظور دماسنجی آزمایش گرمایش و به منظور تعیین نوع نمک‌ها و مقدار شوری آزمایش سرمایش انجام شد. نتایج دماسنجی سیال‌های درگیر در جدول ۲ ارائه شده است.

بر پایه بررسی های انجام شده، سیال های درگیر موجود در نمونه‌ها بیشتر بی‌شکل، مدور و برخی میله‌ای هستند. سیال های درگیر بررسی شده کوچکتر از ۵ میکرون تا ۱۰ میکرون هستند. بر پایه تقسیم بندی‌های ارائه شده در مراجع [۱۷، ۱۸]، این سیال ها از نوع دوفازی غنی از مایع (LV) و تک فاز مایع (L) هستند.

رگه شماره ۱: دمای همگن‌شدگی (T_h) سیال‌های درگیر در رگه شماره ۱ بین ۲۹۸ تا ۳۴۵ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۳۲۴٫۵ درجه سانتی‌گراد است. نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) این سیال‌ها نیز درگستره ۳۵٫۵- تا ۳۷٫۹- درجه سانتی‌گراد است. دمای نهایی ذوب (T_m) نیز از ۱۰٫۶- تا ۹٫۴- درجه سانتی‌گراد متغیر بوده و میانگین آن ۱۰- درجه سانتی‌گراد است. براساس سامانه H_2O- NaCl [۱۲، ۱۳]، مقدار شوری بین ۱۳٫۲ تا ۱۴٫۵ درصد با میانگین ۱۳٫۹ درصد است.

رگه شماره ۲: در این رگه دمای همگن‌شدگی (T_h) سیال‌های درگیر بین ۲۷۴ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۲۸۷٫۳ درجه سانتی‌گراد است. نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) سیال‌های درگیر این رگه از ۳۵٫۷- تا ۳۶٫۸- درجه سانتی‌گراد متغیر است. دمای نهایی ذوب (T_m) نیز بین ۱۶٫۸- تا ۱۵٫۹- درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱۶٫۳- درجه سانتی‌گراد است. بر پایه سامانه H_2O- NaCl [۱۲، ۱۳]، مقدار شوری از ۱۹٫۳ تا ۲۰ درصد متغیر بوده و میانگین آنا ۱۹٫۶ درصد است.

رگه شماره ۳: سیال‌های درگیر در این رگه دارای دمای همگن شدگی (T_h) متغیر از ۱۷۸ تا ۱۹۹ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱۸۸٫۳ درجه سانتی‌گراد هستند. همچنین نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) آن‌ها بین ۳۵٫۴- تا ۳۶٫۸- درجه سانتی‌گراد است. دمای نهایی ذوب (T_m) این سیال‌ها از ۱۷٫۵- تا ۱۶- درجه سانتی‌گراد متغیر بوده و میانگین آن ۱۶٫۸- درجه سانتی‌گراد است. با توجه به سامانه H_2O- NaCl [۱۲، ۱۳]، مقدار شوری متغیر از ۱۹٫۶ تا ۲۰٫۶ درصد با میانگین ۲۰٫۱ درصد است.

جدول ۲ نتایج دماسنجی سیال های درگیر بر کانی کوارتز در منطقه سماخون.

نمونه	X	Y	نوع رگه	تعداد سیال	T_h (°C)	T_m (°C)	شوری(wt. % equiv.)
Sa 144	۲۶۵۹۸۷٫۹۷	۳۹۴۶۱۹۸٫۲۵	۱	۱۷	۲۹۸ تا ۳۴۵	۹٫۴- تا ۱۰٫۶-	۱۳٫۲ تا ۱۴٫۵
Sa 147	۲۶۶۲۰۳٫۶۲	۳۹۴۶۰۰۹٫۲۹	۲	۱۶	۲۷۴ تا ۳۰۰	۱۵٫۸- تا ۱۶٫۸-	۱۹٫۲ تا ۲۰
S 80	۲۶۵۶۵۰٫۴۹	۳۹۴۶۱۳۱٫۵۳	۳	۱۰	۱۷۸ تا ۱۹۹	۱۷٫۵- تا ۱۶-	۱۹٫۴ تا ۲۰٫۶
Sa 87-1	۲۶۴۹۳۰٫۴	۳۹۴۳۸۴۲٫۷	۴	۱۳	۳۱۰ تا ۳۲۸	۱۲- تا ۱۳٫۲-	۱۵٫۹ تا ۱۷
Sa 87-2	۲۶۴۹۰۶٫۴۶	۳۹۴۳۸۳۱٫۹	۴	۲۱	۳۱۰ تا ۳۴۵	۹٫۲- تا ۱۰٫۵-	۱۳ تا ۱۴٫۴

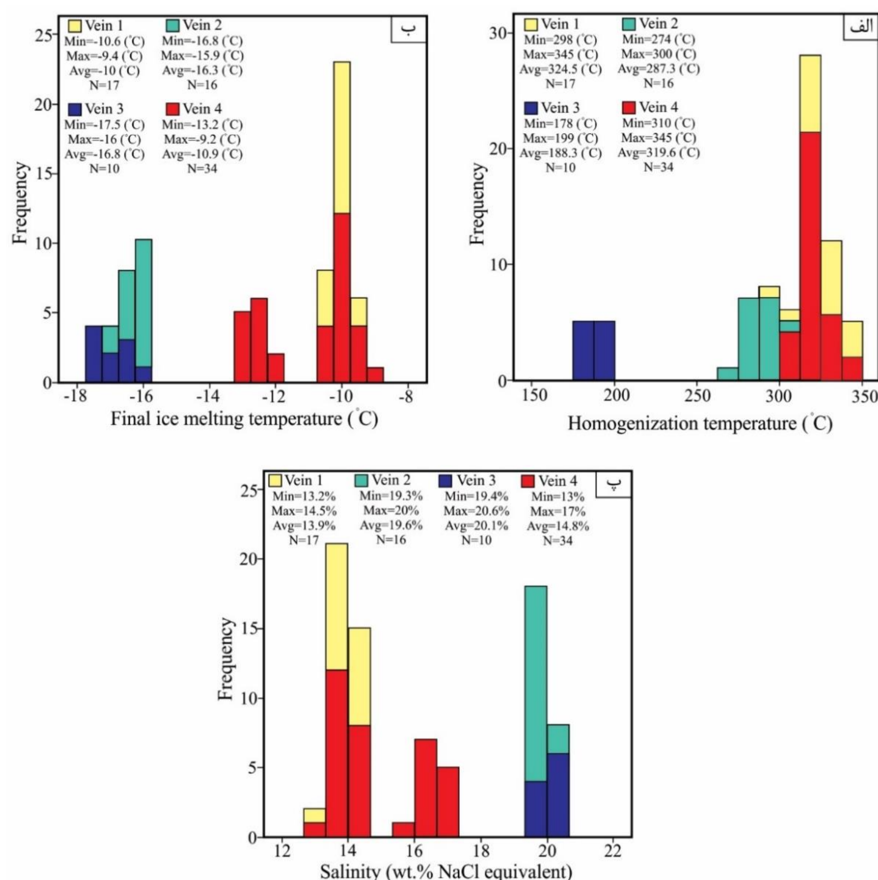
[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.617]

رگه شماره ۴: در رگه شماره ۴، دمای همگن‌شدگی (T_h) سیال-های درگیر بین ۳۱۰ تا ۳۴۵ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده و میانگین آن ۳۱۹٫۶ درجه سانتی‌گراد است. گستره تغییرات نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) این سیال‌های درگیر نیز بین ۳۴٫۲- و ۳۷٫۱- درجه سانتی‌گراد است. دمای نهایی ذوب (T_m) سیال‌ها بین ۱۳٫۲- و ۹٫۲- درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱۰٫۹- درجه سانتی‌گراد است. براساس سامانه H_2O- NaCl [۱۲، ۱۳]، مقدار شوری بین ۱۳ و ۱۷ درصد با میانگین ۱۴٫۸ درصد است.

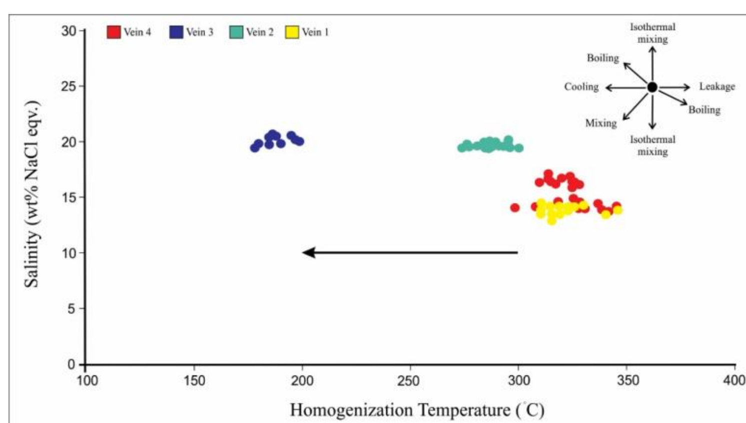
نخستین دمای ذوب‌شدگی رابطه مستقیمی با ترکیب نمک موجود در سیال گرمابی دارد [۱۸]. براساس T_{fm} بدست آمده، نمک‌های $FeCl_2$ ، $MgCl_2$ و $CaCl_2$ در سیال‌های درگیر این ۴ رگه کانی‌سازی وجود دارند. شکل ۶ تا پ نمودارهای ستونی دمای همگن‌شدگی، دمای‌نهایی ذوب یخ و شوری را نشان می‌دهد.

بحث

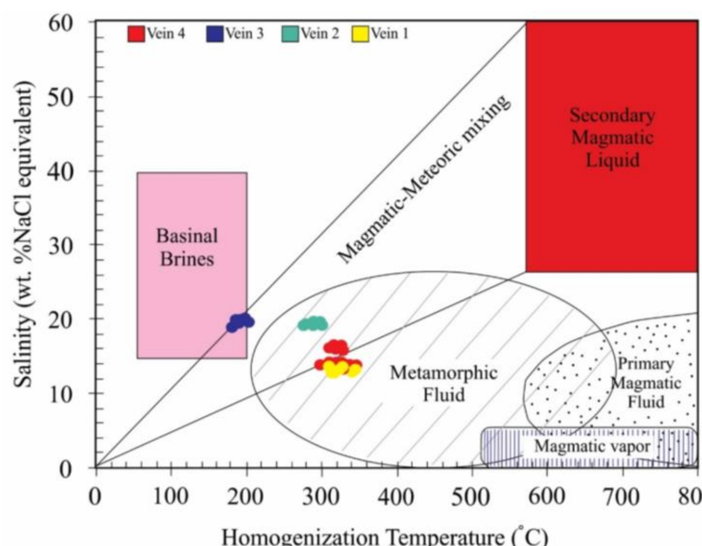
سیال‌های درگیر مورد بررسی دارای تک فاز مایع و دو فاز غنی از مایع هستند. نبود فاز جامد به دلیل شوری پایین تا متوسط سیال‌های کانه‌ساز است. در بررسی‌های سنگ‌نگاری، آثار و شواهدی از پدیده جوشش در سیال‌های درگیر دیده نشد. شکل ۷، نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی برای سیال‌های درگیر در کانی کوارتز همراه با رگه‌های کانی‌سازی را نشان می‌دهد [۱۸]. بر این اساس، رگه‌های کانی‌سازی شماره ۱ و ۴ از نظر دما و شوری شبیه هم هستند و بالاترین دما را نسبت به دو رگه دیگر دارند. رگه‌های شماره ۲ و ۳ دارای شوری یکسان و بالاتری نسبت به رگه‌های ۱ و ۴ بوده اما از نظر دما متفاوت هستند. رگه شماره ۳ پایین‌ترین دما را در بین رگه‌های کانی‌سازی دارد. با توجه به این نمودار، تشکیل سامانه کانه‌زایی و ته‌نشست کانه‌ها در همه پهنه‌های کانی‌سازی همراه با سرد شدن بوده و کاهش دما نقش اصلی را داشته است. همچنین نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی و محیط آب‌های مختلف برای سیال‌های درگیر منطقه سماخون [۱۹] بیانگر محیط آب‌های دگرگونی و گستره آمیختگی آب‌های جوی با آب‌های ماگمایی است (شکل ۸).



شکل۶ نمودارهای ستونی مربوط به دماسنجی سیال‌های درگیر منطقه سماخون. الف) نمودار ستونی دمای همگن‌شدگی، ب) نمودار ستونی آخرین دمای ذوب یخ. پ) نمودار ستونی مقدار شوری.



شکل ۷ نمودار شوری- دمای همگن‌شدگی سیال‌های درگیر در منطقه سماخون. روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما- شوری برگرفته از مرجع [۱۸] هستند.



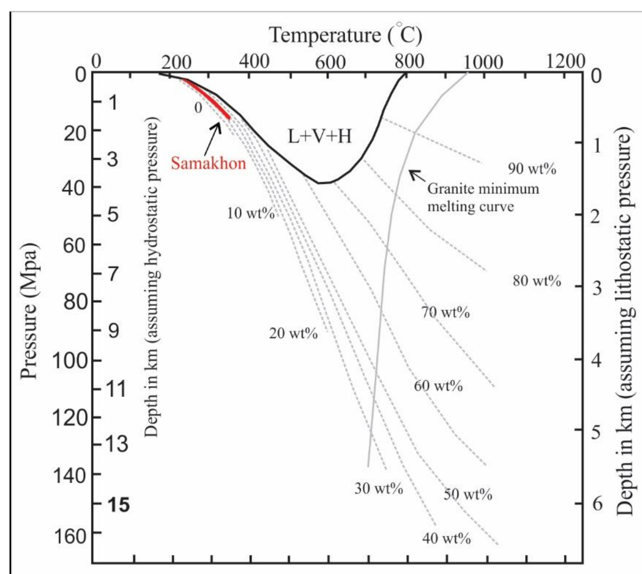
شکل ۸ نمودار شوری- دمای همگن شدگی سیال‌های درگیر در منطقه سماخون. محیط‌های تعریف شده برگرفته از مرجع [۱۹] هستند.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، آثار و شواهدی از دگرگونی در این گستره دیده نشد بنابراین نمی‌توان آب‌های دگرگونی را مؤثر در حمل و انتقال فلزها در نظر گرفت. از این رو، محلول کانه‌دار آمیزه‌ای از آب‌های ماگمایی و جوی بوده است. در این فرآیند، محلول ماگمایی دربردارنده عناصر فلزی با دما و شوری بالا به سمت سطح زمین حرکت می‌کند و از سویی آب‌های جوی با دما و شوری پایین از فضای شکستگی‌ها و درز و شکاف‌ها به اعماق زمین نفوذ کرده و با محلول ماگمایی مخلوط می‌شوند و طی جریان همرفتی- آمیختگی سیال کانه‌دار تشکیل می‌شود. سرانجام، در اثر عوامل مختلفی چون کاهش دما و افزایش pH، کانه‌زایی در پهنه‌های گسلی رخ می‌دهد. به باور بسیاری از پژوهشگران، خطوط اصلی عمیق به احتمال بسیار انتقال فلزها را فراهم نموده یا فضاهای خالی برای جریان یافتن سیال‌ها را ایجاد می‌کنند و این محلول‌ها (سیال‌ها) از گسل‌های عمیق بزرگ به محل‌های مناسب ته‌نشین شدن در راستای گسل‌های کوچک‌تر مهاجرت می‌نمایند [۲۰- ۲۴].

در منطقه سماخون، توده‌های نیمه عمیق گرانیتوئیدی به صورت استوک و دایک رخنمون دارند که شاهدی بر وجود فعالیت‌های ماگمایی در این گستره هستند. از سویی، یکسان بودن توالی کانی‌ها در رگه‌های کانی‌سازی بیانگر هم خاستگاه بودن رخداد کانه‌زایی است. بررسی توالی همبرزایی رگه‌های کانی‌سازی در منطقه سماخون بیانگر تغییر کانه‌زایی همراه با کانی کوارتز به رگچه‌های تأخیری کلسیت است. این تغییرات پاراژنز در پهنه‌های کانی‌سازی نشانگر تکامل محلول گرمابی از pH اسیدی محیط به حالت قلیایی است.

با توجه به نمودار عمق- دما- فشار سیال‌های درگیر در منطقه سماخون (شکل ۹)، رگه‌های کانی‌سازی در عمق کمتر از ۱ کیلومتری براساس فشار سنگ ایستایی سطح زمین و فشار کمتر از ۲۰ مگاپاسکال تشکیل شده‌اند.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.617]



شکل ۹ نمودار دما- عمق- فشار سیال‌های درگیر در منطقه سماخون بیانگر ارتباط فازها در سامانه $NaCl–H_2O$ در فشارهای ایستابی و سنگ ایستایی [۲۵]. (H: هالیت، V: بخار و L: مایع) خط چین‌ها پربندهای ثابت درصد وزنی NaCl محلول در شورابه هستند. خط باریک خاکستری منحنی کمترین ذوب گرانیت را نشان می‌دهند. خط ضخیم مشکی مرز سه فاز، L+V+H را برای سامانه $NaCl–KCl–H_2O$ با Na/K در محلول ثابت شده با آلبیت و پتاسیم فلدسپات در دماهای معینی را مشخص می‌کند.

برداشت

بخشی از رخداد کانه‌زایی در منطقه سماخون، یک سامانه کانه‌زایی رگه-رگچه‌ای با کنترل ساختاری است که در درون توف-های بازالتی تا آندزیتی (شمال منطقه) و مرز بین آهک و توف بازالتی تا آندزیتی (جنوب غربی منطقه) تشکیل شده است. درز و شکاف‌های ایجاد شده در پهنه‌های گسلی و خلل و فرج موجود در سنگ میزبان، مسؤول راه‌یابی و دسترسی محلول گرمابی به سمت سطح زمین و ته‌نشست کانی‌ها بوده است. در نتیجه این فرایند موجب تشکیل کانی‌های کالکوپیریت، بورنیت و پیریت همراه با کانی‌های باطله کوارتز و کلسیت گردیده است. سپس طی مرحله اکسایش و هوازدگی کانی‌های ثانویه مس و اکسیدهای آهن تشکیل شده‌اند.

بر پایه بررسی سیال‌های درگیر بر کانی کوارتز همراه با کانه‌زایی در ۴ رگه کانی‌سازی، دمای تشکیل کانی‌سازی از ۱۷۸ تا ۳۴۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است. کانی‌سازی از محلولی نمک‌های $FeCl_2$، $MgCl_2$ و $CaCl_2$ با شوری ۱۳٫۷ تا ۲۰٫۶ درصد به وجود آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده از دماسنجی سیال‌های درگیر، کاهش دما و آمیختگی آب‌های جوی با سیال‌های ماگمایی باعث افزایش pH و ته‌نشست کانه-های سولفیدی شده است.

نتایج تجزیه نمونه‌های زمین شیمی از محل کانی‌سازی نشان داد که بیشترین مقدار مس ۴٫۵ درصد است که با شواهد و رخنمون کانه‌زایی در محل ترانشه‌ها، همخوانی دارد. مقادیر به دست آمده برای عناصر طلا، نقره، سرب، روی، آنتیموان و آرسنیک بسیار پایین و غیر قابل توجه است. وجود توده‌های نفوذی نیمه عمیق گرانیتوئیدی در این منطقه بیانگر فعالیت-های ماگمایی در عمق است. به نظر می‌رسد که رگه‌های کانی-سازی مس در منطقه سماخون از یک خاستگاه ماگمایی در عمق به وجود آمده باشند. از این رو می‌توان وجود توده‌های عمیق و نیمه عمیق را به عنوان خاستگاه کانه‌زایی مس در این منطقه متصور شد. شواهد و اطلاعات بدست آمده بیانگر یک سامانه کانی‌سازی رگه‌ای مس گرمابی در منطقه سماخون است.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۵۶۰۴۴٫۳ مورخ ۱۴۰۰٫۸٫۲۲ انجام شده است. از آقای مهندس انتظار عرب و خانم مهندس معمری که در اجرای عملیات صحرایی کمک نمودند، کمال تشکر را داریم.

مراجع

[1] Zhai D., Liu J., Zhang H., Tombros S., Zhang A., *"A magmatic-hydrothermal origin for Ag-Pb-Zn vein formation at the Bianjiadayuan deposit, inner Mongolia, NE China: Evidences from fluid inclusion, stable (C-H-O) and noble gas isotope studies"*, Ore Geol. 101 (2018) 1-16.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.617]

microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H_2O–NaCl", Computer in Geosciences 49 (2012) 334–337.
[14] Ghaemi F., Hosseini K., *"1:100,000 Geological Map of Sefid sang"*, Geological Survey of Iran (1999). (in Persian).
[15] Whitney D.L., Evans B.W., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals"*, American Mineralogist 95 (2010) 185–187.
[16] Wilkinson J.J., *"Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits"*, Lithos 55 (2001) 229–272.
[17] Roedder E., "*Fluid inclusions"*, Reviews in Mineralogy 12 (1984) 644.
[18] Sheppherd T.J., Rankin A.H., Alderton D.H.M., *"A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies"*, Blackie and Son (1985) 239.
[19] Beane R.E., *"The Magmatic–Meteoric Transition. Geothermal Resources Council"*, Special Report 13 (1983) 245–253.
[20] Haddouche O., Boutaleb A., Chamam M., Ysbaa S., Hammouche H., Boubaya D., *"Pb-Zn (Ba) deposits of the oriental Saharan Atlas (north-east of Algeria): distribution, control and implications for mining exploration"*, Arabian Journal of Geosciences (2016) https://doi.org/10.1007/s12517- 016-2406-x
[21] Haddouche O., Hebert R., Boutaleb A., *"Géologie et microthermométrie des minéralisations à Ba-Pb (Zn-Cu), liées au segment NE du Djebel Azreg-Djebel Khenchela (Monts des Aurès): Exemple des gisements d'Ichmoul et d'Ain Mimoun"*. Bull Serv Géol Algérie 21(2010) 165–182.
[22] Boutaleb A., *"Les minéralisations Pb-Zn du domaine SétifienHodna : Gîtologie, pétrographie des dolomies, microthermométrie et implications métallogénique"*, Thèse. Doct. D'Etat, USTHB (FSTGAT) Alger. Algérie (2001).
[23] Sami L., *"Caractérisation géochimique des minéralisations à Pb-Zn, F, Ba, Cu, Fe et Hg des confins Algéro-tunisiens"*, Thèse. Doct. d'Etat, (FSTGAT) USTHB, Algérie (2011) 179.
[24] Ysbaa S., Haddouche O., Boutaleb A., Chemam M., Sadaoui M., *"Mineral deposits of northeastern Algeria (southern Medjerda mounts and diapiric zone): regional-scale structural controls, spatial distribution, and importance of geophysical lineaments"*, Arabian Journal of Geosciences12 (2019) 482.
[25] Fournier R.O., *"Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment"*, Econ. Geol. 94 (1999) 1193–1212.
[2] Kissin S.A., Mango H., *"Silver Vein Deposits. Treatise on Geochemistry"*, Elsevier (2014) 425–432.
[3] Ghandomkar A.H., *"Petrology, mineralization, geochemistry, and Interpretation of IP / RS data of Bot-e-Gaz prospect area, NE Torbat-e-Jam"*, Ms.C thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (2009) 122p. (in Persian).
[4] Malekzade Shafaroudi A., Karimpour M.H.,*" Mineralogy and thermometry studies of Sirzar antimony prospect area, north of Torbat-e-Jam, Khorasan Razavi Province"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 20 (2012) 565-582. (in Persian).
[5] Saadat S., Shahabpur J., *" An Appraisal ur Mineralization Antimony in Sirzar Area (Nurth Ea st uf Khurasan)"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 5 (1997) 45-58. (in Persian).
[6] Ghavi J., Karimpour M.H., Mazaheri A., Ghaderi M., Rahimi B., *" Identifying secondary dispersion halos and geochemical element distribution in soils on the Tarikdarreh Au-W prospect area, north of Torbat-e-Jam, NE Iran"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 21 (2013) 107-120. (in Persian).
[7] Asadzadeh Z., Hidarian Shahri M.R., Malekzade Shafaroudi A.,*" Interpretation of IP / RS data using geology & mineralization in the Almajough Copper area, Torbat-e Jam, Khorasan Razavi"*, 7th Economic Geology Congeress 2015. (in Persian).
[8] Ghelichkhani M., Malekzade Shafaroudi A., Hidarian Shahri M.R.,*" Geology, mineralization and geochemistry of Firouzkuh prospect area, northeast of Torbat-e- Jam"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 21 (2014) 685-702. (in Persian).
[9] Sahandi M.R., Soheily M., Sadeghi M., Delavar S.T., Jafari Rad A.,*"Geological Map of Iran, 1:1,000,000"*, Geological Survey of Iran (2002).
[10] Nabavi M.H., *"An Introduction to the Geology of Iran"*, Geological Survey of Iran Publication (1976). 109 (in Persian).
[11] Ruttner A.W., *"Geology of the Aghdarband area (Kopet Dagh, NE-Iran)"*. Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt 38 (1991) 7–79
[12] Lecumberri-Sanchez P., Steel-MacInnis M., Bodnar R.J., "*A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance*", Geochim Cosmochim Acta 92 (2012) 14-22.
[13] Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J., *"HOKIEFLINCS-H_2O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting*